

# *Impact du lien radio sur les performances des protocoles de couverture de surface pour réseaux de capteurs*

Antoine Gallais <sup>\*</sup>, Hervé Parvery <sup>\*\*</sup>, Jean Carle <sup>\*</sup>,  
Jean-Marie Gorce <sup>\*\*</sup> et David Simplot-Ryl <sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> IRCICA/LIFL, Univ. Lille 1, INRIA Futurs

<sup>\*\*</sup> CITI, ARES/INRIA Rhône-Alpes, INSA-Lyon

---

L'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs constitue l'objectif premier de la majorité des protocoles proposés. L'idée originale déjà exploitée est de profiter de la redondance issue du déploiement aléatoire des nœuds sur la zone à surveiller pour procéder à leur mise en veille alternée. La topologie dynamique induite ne doit pas compromettre l'application de surveillance. Pour réussir à éteindre des objets tout en garantissant une couverture équivalente à celle fournie par la totalité des nœuds, les protocoles de couverture de surface que nous étudions ne se basent que sur des informations locales, évitant ainsi la lourde gestion d'une approche centralisée. Les capteurs échangent des informations avec les capteurs à portée de communication afin de décider lesquels d'entre eux peuvent effectivement se mettre en veille. Ces protocoles de couverture de surface ont jusqu'à présent été évalués à partir de simulations intégrant un modèle de couche physique des plus simplistes, et conduisant au classique disque unitaire de communication associé à chaque nœud. On distingue alors pour chaque source, les nœuds à portée, qui reçoivent systématiquement tous les messages, et les nœuds hors de portée. Nous proposons dans cet article d'évaluer l'influence du canal radio sur les performances des protocoles de couverture. Nous montrons qu'une probabilité de réception non binaire peut introduire intrinsèquement des dysfonctionnements des protocoles utilisant un modèle à seuil. Nous identifions également quelques pistes de recherche pour l'étude de réseaux auto-organisés dans des conditions plus proches de la réalité.

**Mots-clefs:** Couche physique réaliste, modélisation de canal, réseaux ad hoc, réseaux de capteurs, auto-organisation

---

## 1 Introduction

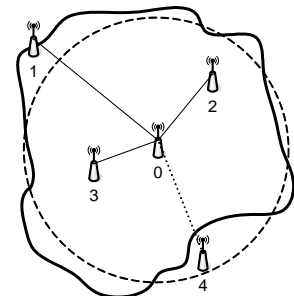
Les réseaux de capteurs ont fait naître de nombreuses problématiques de recherche, tant par les applications potentielles qu'ils laissent entrevoir que par les diverses contraintes qu'ils supposent. Nous considérons des capteurs équipés de modules de communication et d'acquisition d'information, particulièrement contraints en énergie. Déployés sur une zone sensible à surveiller, ces objets doivent être capables de s'auto-organiser dans le but d'observer correctement leur environnement. Ce besoin d'auto-organisation provient de la dynamique induite par la mise en veille alternative des nœuds que l'on introduit pour des raisons d'économie d'énergie (les batteries ne pouvant être en général ni rechargées, ni remplacées). Les protocoles de couverture de surface dans les réseaux de capteurs reposent sur des envois d'information des capteurs vers leurs voisins de communication. Actuellement, la plupart des solutions existantes sont évaluées avec un modèle de communication réduit au disque unitaire. Chaque nœud possède une portée de communication, au delà de laquelle aucun message ne peut être envoyé directement, ni reçu. Cette stabilité spatiale et temporelle du canal est implicitement exploitée par la plupart des protocoles. Nous proposons dans cet article d'évaluer l'impact d'une réalité du canal radio : la probabilité d'erreur en fonction du rapport signal à bruit.

Après avoir détaillé le modèle de canal employé dans cet article, nous présentons quelques protocoles visant à assurer la couverture de surface dans les réseaux de capteurs. La dernière partie de cet article est dédiée à une discussion autour du choix du modèle de canal, appuyée par les résultats expérimentaux.

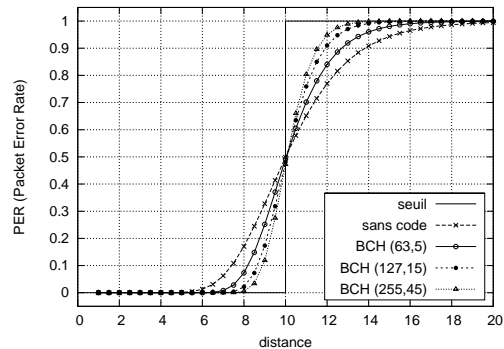
## 2 Préliminaires et travaux existants

### 2.1 Modèle de canal

Dans la majorité des études actuelles portant sur les réseaux multi-sauts, les modèles pris en compte pour la couche physique restent simplistes. En effet, la zone de communication d'un capteur est généralement considérée comme un disque unitaire, sur lequel les paquets sont transmis sans perte alors qu'aucun paquet n'est reçu en dehors. La réalité est bien entendu plus complexe. La bonne réception d'un paquet exige que le nombre d'erreurs de transmission soit toujours inférieur à la capacité de correction du code canal utilisé (s'il en existe un). Avec un modèle de canal simpliste, dit canal gaussien ou AWGN (Additive White Gaussian Noise), le taux d'erreur de transmission est directement lié au rapport signal à bruit. Chaque nœud a donc une certaine probabilité de recevoir un message, cette probabilité tendant vers 0 à l'infini. Si l'on prend en compte cette réalité, la notion de seuil disparaît pour suivre une loi de probabilité fonction de la distance  $d$ . Dernièrement, plusieurs travaux concernant la connexité des réseaux se sont intéressés à l'impact d'une couche physique plus réaliste. Dans ces travaux, le canal radio est modélisé (fading, shadowing ...) en ajoutant à la portée de communication ( $\frac{1}{d^\alpha}$ ,  $\alpha$  étant le coefficient d'affaiblissement lié à l'environnement), un affaiblissement aléatoire suivant une distribution log normal [MA05, BH03, HM04]. Cette modélisation a pour effet de modifier la forme de la zone de communication. Fig. 1(a), avec le modèle à disque unitaire, 4 serait voisin direct de 0, contrairement à 1 situé hors du disque. Cependant, dans ces travaux, une fois la loi d'affaiblissement modifiée, un seuil non isotrope est à nouveau appliqué, et la zone de communication de chaque nœud est calculée. Cette hypothèse de seuil de réception est justifiée par la théorie de l'information qui nous dit qu'il est toujours possible, en appliquant un bon codage canal, d'obtenir un modèle à seuil. En effet, comme le montre la figure 1(b), plus la taille du codage est importante, plus la loi de PER (Packet Error Rate) se rapproche du modèle à seuil isotrope. Cependant, il faudrait utiliser un code de longueur infinie pour atteindre réellement ce modèle. L'autre solution possible pour redresser les lois de PER est la réémission des paquets. Ce n'est rien d'autre qu'un mauvais codage canal, si l'on se place d'un point de vue théorie de l'information. Notons que pour des paquets de petites tailles, ce qui est en général le cas pour les réseaux de capteurs, le codage direct s'avère plus efficace d'un point de vue énergétique que la réémission [SAM03, KSPR04]. Plutôt que de chercher les moyens d'obtenir un modèle de communication à seuil, nous proposons d'évaluer l'impact de cette probabilité de réception, en intégrant dans des simulations un modèle de canal gaussien. Nous utilisons les probabilités présentées sur la figure 1(b). Ces courbes représentent le PER d'un paquet de 30 bits de données, transmis avec une modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying), dans un canal AWGN, avec ou sans code correcteur d'erreurs. Le codage pris en compte est un code correcteur d'erreurs BCH( $n, k$ ) (Bose-Chaudhuri-Hochquenghem,  $n$  étant la longueur du code et  $k$  le nombre d'erreurs détectables). La puissance d'émission, suivant le codage utilisé, est adaptée de telle sorte que la probabilité d'erreur de 0,5 soit obtenue à une distance fixe arbitraire  $d = 10$ .



(a) Impact sur le graphe de communication



(b) PER, modulation BPSK, canal AWGN, paquet de 30 bits de données

**Fig. 1:** Modélisation de canal réaliste

## 2.2 Couverture de surface

Dans un réseau de capteurs, chaque nœud peut détecter un évènement dans une zone donnée. Dans cette étude de l'impact du modèle physique sur les communications, nous nous limiterons à l'hypothèse du disque unitaire pour cette surface. La surface couverte par le réseau est l'union des différentes zones de couverture de chaque objet. Les protocoles de couverture de surface visent à diminuer le nombre de nœuds actifs tout en conservant une couverture équivalente à celle offerte par l'ensemble des objets. Nous écartons d'emblée tout protocole nécessitant une gestion centralisée du réseau, à la fois trop lourde et trop coûteuse pour les objets que nous considérons. Nous nous concentrons alors sur les algorithmes localisés. La difficulté est d'assurer une couverture de zone totale à partir de décisions locales simples, tout en minimisant le nombre de nœuds actifs et l'énergie totale consommée. Un mécanisme de mise en veille alternative assurant une couverture totale est proposé dans [TG02]. Après une première phase de découverte du voisinage, chaque nœud décide d'un temps d'attente aléatoire au bout duquel il calcule la couverture fournie par ses voisins. En cas de couverture totale, il décide d'être inactif et envoie un message de retrait à ses voisins. Ceux n'ayant pas encore décidé mettent à jour leur table de voisinage. S'il décide de rester actif, aucun message n'est envoyé. Enfin, Gallais et al., dans [GCSRS06], proposent une solution économe en nombre de messages échangés. Aucune phase de découverte de voisinage n'est nécessaire et seuls les messages d'activité sont émis. Selon un mécanisme de temps d'attente aléatoire, chaque nœud décide de son activité en fonction des voisins qu'il connaît. Si ces derniers ne procurent pas une couverture suffisante, il décide d'être actif et d'envoyer un message déclarant son activité. Sinon, il peut se mettre en veille sans envoyer de message.

## 3 Impact d'une modélisation de canal réaliste

La simulation se déroule en tours au début desquels chaque capteur décide de son activité. Possédant des batteries dont le niveau initial est fixé à 100, chaque nœud perd 1 point de batterie s'il est actif, 0 sinon. Nous avons modifié deux solutions existantes pour la couverture de surface ([TG02] et [GCSRS06], ainsi désignées sur les courbes de cet article) afin d'y intégrer différents modèles de canal. Nous avons choisi de ne discuter que du nombre de nœuds actifs (le temps de vie du réseau en découlant automatiquement, étant donné le modèle simpliste de consommation énergétique que nous utilisons) et du niveau de couverture procuré par chacun des deux protocoles. Les résultats sont donnés pour deux densités distinctes (nombre moyen de nœuds par zone de communication) simulées avec une couche MAC idéale. Dans le cas d'un modèle basé sur le disque unitaire, les deux protocoles assurent une couverture totale à l'aide d'un faible pourcentage de noeuds actifs (Tab. 1).

	Densité 50		Densité 70	
	% nœuds actifs	% couverture	% nœuds actifs	% couverture
[TG02]	12	100	8	100
[GCSRS06]	22	100	17	100

**Tab. 1:** Modélisation disque unitaire

Lorsqu'un modèle de canal réaliste est substitué au disque unitaire, le comportement des protocoles s'en trouve modifié. Pour l'algorithme de [TG02], des messages de retraits, émis par les nœuds qui ont décidé de se mettre en veille, ne sont pas reçus conduisant à des décisions erronées. La figure 2 montre ainsi que le pourcentage de nœuds actifs de [TG02] diminue considérablement par rapport aux résultats obtenus avec le modèle à seuil (environ 3% et 1.6% pour les densités 50 et 70 respectivement). Si cette diminution est bénéfique pour le temps de vie du réseau, elle entraîne en revanche une chute de la couverture de surface (de 60% à densité 50, à seulement 37.3% à densité 70, Fig. 2). De plus, si l'introduction de codage dans les messages améliore légèrement ces résultats, il s'avère que [TG02] n'est pas du tout adapté à un canal réel, à cause des conséquences importantes des aléas de communication et de la non détection par le voisinage d'un message de retrait. Seuls des codes de taille très importante, inadaptés aux contraintes énergétiques des réseaux de capteurs, permettraient d'obtenir le comportement initial observé en environnement réaliste. On peut enfin constater que l'introduction du modèle de canal réaliste ne compromet pas la surveillance

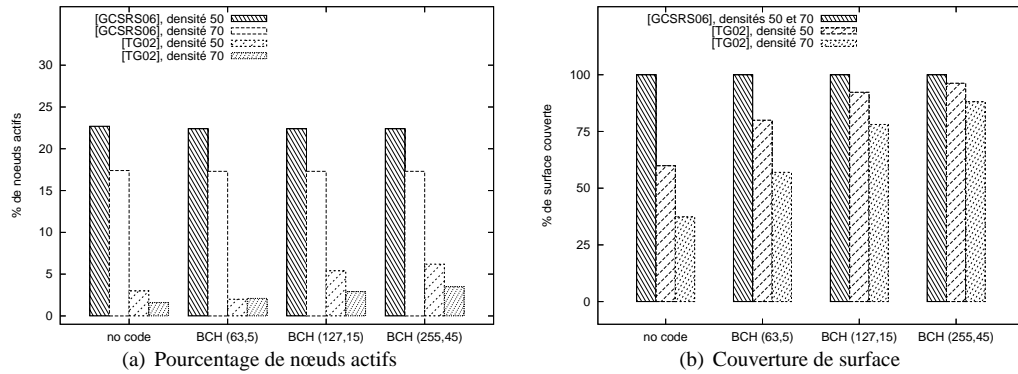


Fig. 2: Impact de la couche physique

de [GCSRS06] (Fig. 2) car les nœuds ne recevant aucun message d'activité décident d'être actifs. Il s'agit donc un algorithme robuste aux erreurs de transmissions.

## 4 Conclusion

La validation de protocoles sur un modèle de canal simpliste ne suffit donc pas à garantir son fonctionnement en environnement réel. Le passage à un environnement plus réaliste peut entraîner des dysfonctionnements importants. Ce travail montre que les solutions envisageables pour lutter contre les erreurs de transmission peuvent s'envisager aussi bien du côté de la couche protocolaire que de celui de la couche physique. Si le codage canal peut améliorer les performances, la meilleure solution semble être toutefois de concevoir des algorithmes d'auto-organisation où la perte de messages ne saurait compromettre l'activité du réseau. Outre le maintien de la couverture totale de surface, caractériser et surtout assurer la connexité de l'ensemble des nœuds actifs demeure un problème ouvert dès lors que le modèle du disque unitaire n'est plus employé. Nos prochains travaux s'attacheront par conséquent à garantir une probabilité de connexité suffisante tout en minimisant le nombre de nœuds actifs. Les solutions envisagées telles que le codage, les réémissions de messages, ou encore la caractérisation des nœuds isolés devront être évaluées à l'aide de modèles énergétiques plus complets, intégrant l'ensemble des coûts inhérents à l'activité d'un capteur.

## References

- [BH03] C. Bettstetter and C. Hartmann. Connectivity of wireless multihop networks in a shadow fading environment. In *Proc. of ACM Intl' workshop MSWIM*, San Diego, USA, 2003.
- [GCSRS06] A. Gallais, J. Carle, D. Simplot-Ryl, and I. Stojmenovic. Localized sensor area coverage with low communication overhead. In *Proc. of PerCom*, pages 328–337, Pisa, Italy, 2006.
- [HM04] R. Hekmat and P. Van Mieghem. Study of connectivity in wireless ad-hoc networks with an improved radio model. In *Proc. of Intl' workshop WiOpt*, Cambridge, UK, 2004.
- [KSPR04] H. Karvonen, Z. Shelby, and C. Pomalaza-Raez. Coding for energy efficient wireless embedded networks. In *Proc. of Intl' workshop IWWAN*, Oulu, Finland, 2004.
- [MA05] D. Miorandi and E. Altman. Coverage and connectivity of ad-hoc networks in presence of channel randomness. In *IEEE INFOCOM*, Miami, USA, 2005.
- [SAM03] Y. Sankasubramaniam, I.F. Akyildiz, and S.W. McLaughlin. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks. In *Proc of IEEE SNPA*, Anchorage, USA, 2003.
- [TG02] D. Tian and N. Georganas. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In *Proc. of ACM WSN*, Atlanta, USA, 2002.